

電動肩義手における赤外線アレイセンサを用いた安全システムの基礎研究

Fundamental study on safety control for electrical upper limb prosthesis using infrared array

○ 須藤聡一（芝工大） 米田隆志（芝工大） 李虎奎（芝工大）

斎藤之男（芝工大） 東原孝典（高松義肢製作所）

Akikazu SUDO, Shibaura Institute of Technology College of Systems Engineering and Science
Takashi KOMEDA, Shibaura Institute of Technology College of Systems Engineering and Science
Hokyo LEE, Shibaura Institute of Technology College of Systems Engineering and Science
Yukio SAITO, Shibaura Institute of Technology College of Systems Engineering and Science
Takanori HIGASHIHARA, Takamatsu Prosthetics Orthotics CO., LTD

Abstract: Electrical prosthesis for the disarticulation of shoulder and upper limb is applied to the forequarter amputation. The movement of externally prosthesis has danger contacting with user's face, because it has high DOF mechanism and large working area. To ensure safety, the safety system should monitor position of user's face and prevent it from contacting with prosthetic hand.

In this report, we describe on the fundamental study to establish the safety system by measuring intervals between the surface of skin and hand part. The shoulder prosthesis until now haven't acquired the system to prevent from collision with prosthesis, face and head directly as same as robots. So, we haven't utilized shoulder prosthesis actively and delayed in application. We show the possibility for the safety system as the fundamental study this time.

Key Words: Safety ayatem, upper extremity prosthesis, Infrared array sensor, Distance estimation

1. 序論

上肢切断者の約4割は、上腕切断や肩離断などの高位上肢切断者という調査結果がある⁽¹⁾。高位上肢切断者に対する義手として、肩義手や上腕義手が適用され、筋電制御式義手(以下電動義手)開発はあるが、臨床応用は、コスト、重量、サポート不足などの点から大変遅れている。また、肩義手は複雑な動作となり、義手側のコントローラ内に安全システムを入れない限り操作は難しい。

近い将来での実用化には、操作する上での安全性は重要であるが、安全性に関する研究が進んでいない。現在、安全において第一に考慮すべき点は、義手と義手使用者の衝突である。臨床応用を考えた場合、製造者責任法(PL法)の観点からも安全確保は不可欠である。

電動義手は、切断部位が高位であるほどアームが多自由度化し、制御が困難になるとともに使用者自身の顔や頭と衝突する可能性が高まる。従来のロボットでは、数値制御を用いた動作範囲の限定による安全確保が一般的であるが、この方法を多自由度を有する肩義手などに応用した場合、操作者の頭部が義手の動作領域に侵入する可能性が有り、アームの頭や顔への衝突回避にはならない。そこで、使用者の動きや、頭部までの距離をリアルタイムで計測可能なロボットビジョンシステムを義手の手部に搭載することで、アームと使用者の衝突回避と、動作時の安全性を高めることが可能である。距離計測には、ステレオビジョン⁽²⁾、単一カメラによる距離計測⁽³⁾など、CCD画像を用いた手法が手法が一般的であるが、近接時の距離計測が不可能である。この問題点を解決するため、義手に搭載可能な距離計測システムには温度画像センサが有用であると考えられる。本研究では温度画像センサを用いることで、接近に伴う形状変化および温度変化から距離推定を行い、アームの顔への最接近時にリアルタイムで距離計測可能なシステムの基礎研究を行ったものである。

2. 開発システムの概要

2.1 赤外線アレイセンサ

Fig. 1に本研究で使用する赤外線アレイセンサ、Table 1に同赤外線アレイセンサの仕様を示す。本研究では、義手使用者の顔の温度、形状の情報を取得し、義手のアーム先と顔の距離を計測することを可能とするため、Panasonic社製の赤外線アレイセンサGrid-EYEをシステムに導入した。赤外線アレイセンサは、物体から放射される赤外線を検知して8×8(64画素)の素子がエリアの温度分布画像を出力し、それぞれの画素をそのまま位置座標として温度値を収集する。

赤外線アレイセンサは、接近に伴う対象領域の温度変化を取得できるため、画像情報から形状を認識できない最接近時でも、人の顔など熱源物体であれば温度変化から距離計測が可能である。出力画素数は64画素であり、CCDセンサに比べると画素数は格段に劣るが、低画素であるため高速処理が可能で、リアルタイムでの処理が容易である。また、小型・安価であることから義手のアーム先にセンサを搭載し、顔との距離を計測するシステムの実現が可能となる。

Table 1 Specification of infrared array sensor

Type of sensor	Grid-EYE(AMG8831)
Number of pixel	8×8(64pixel)
Range of temperature[°C]	0~80
Angle of view[deg]	60
Frame rate[fps]	10
Output resolution[°C]	0.25
Detection distance[m]	Max. 5

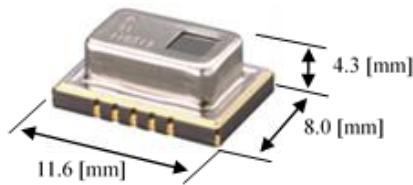


Fig. 1 Overview of Infrared Sensor Grid-EYE

2.2 赤外線アレイセンサを用いた距離計測システム

Fig. 2 に開発システムの概略図，Fig. 3 に赤外線アレイセンサで取得した距離ごとの温度画像を示す．本システムでは，義手のアーム先に搭載した赤外線アレイセンサから取得した温度画像よりリアルタイムで対象の温度及び形状を検知する．これらの情報から，義手のアーム先と顔までの距離をリアルタイムでモニタリングすることで義手と使用者の衝突を回避する．

Fig. 3 に示すように，赤外線センサにより取得する画像は，対象までの距離に応じて，観測される対象物体の形状や温度が変化することが確認できる．この特性を生かし，本システムでは，赤外線アレイセンサから取得した温度画像から得る，対象の温度・形状情報と，アーム先座標の関係性を示す校正式を事前に求め，距離計測を行う．

校正式を算出するにあたって，義手の動作可能最大距離として設定した人の顔から 300[mm]の位置で計測した際の対象領域の平均温度が 30[°C]であったことから，30[°C]を閾値として背景から対象領域を抽出する．最終的には，対象領域である人の顔部分における温度のパターンと距離を対応づけたパターンマッチングにより，距離計測を行う予定である．

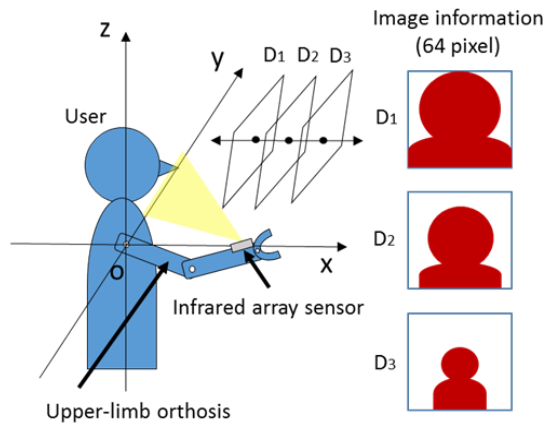


Fig. 2 Diagrammatic illustration of development system

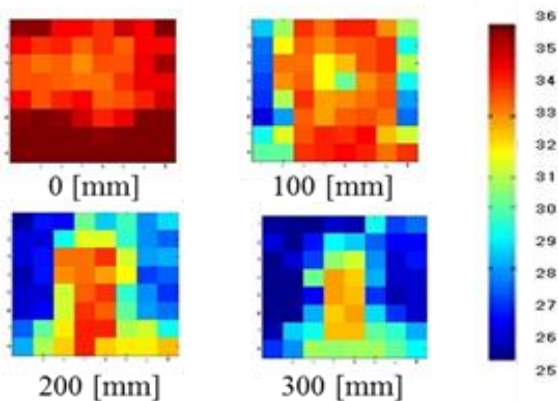


Fig. 3 Measured image by infrared array sensor

3. 動的距離計測手法評価実験

3.1 評価実験システム構成

Fig. 4 に実験システムの構成，Fig. 5 に実験用 upper limb 装具を示す．本システムでは，義手の装着を模擬しアーム先座標ごとに計測した赤外線センサによる温度画像を取得することが可能である．実験用 upper limb 装具(模擬義手)，PC，マイコンボードで構成されており，実験用 upper limb 装具の手部には赤外線アレイセンサ，各関節位置にはポテンショメータが搭載されている．各センサの出力はマイコンボード(Arduino Leonardo)を介して PC ヘッドレス通信する．赤外線アレイでは温度画像を取得し，その特徴を基に計測距離の算出を行う．ポテンショメータでは上肢 6 関節の角度を取得し，順運動学でアーム先の座標及び顔との距離を算出する．赤外線センサによる距離の計測精度を評価するにあたり，準運動学により算出した距離を基準距離として評価実験を行った．

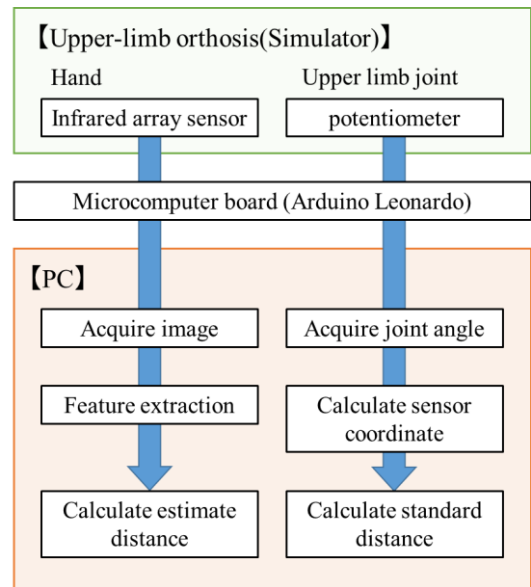


Fig. 4 Configuration of experimental system

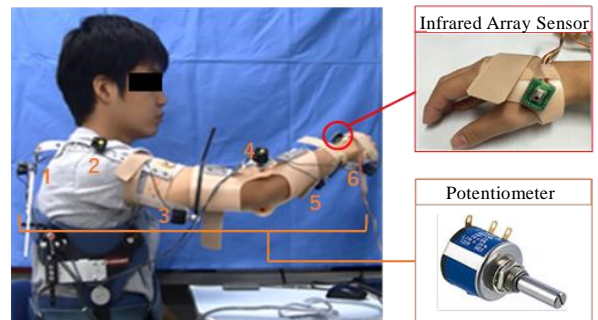


Fig. 5 Overview of upper limb orthosis

3.2 実験目的及び方法

Fig. 6 に赤外線アレイセンサで得た温度情報の特徴とアーム先座標の関係を算出するための校正結果を示す．提案した赤外線アレイセンサを用いた距離計測手法を義手に応用した際の有用性を評価するために，義手の使用環境を再現した動的条件下における距離計測を行った．被験者が手部に赤外線アレイセンサを搭載した実験用 upper limb 装具を装着し，顔に対して手部を接近・離反動作を行い，手部と顔の距離を赤外線アレイセンサの出力から計測する．実験用 upper limb 装具の各関節角度から準運動学により基準距離を取得し，赤外線アレイセンサによる計測距離と比較することで提案

した距離計測手法の精度を評価する．距離計測の範囲は約10～300[mm]とし，一回の計測で顔に対する手部の接近・離反動作を連続的に5回行った．また，頭部の姿勢変化に伴う距離計測精度の変化を検証するため，顔の向きが正面時に計測するパターン，横向きに計測するパターンの2パターンで計測を行った．手部の各座標で赤外線アレイセンサから取得した温度画像の特徴と基準距離の関係を算出する校正式は，顔の正面に対して接近・離反動作を行った際に，温度画像の顔部分の累積温度を2次関数で近似した．

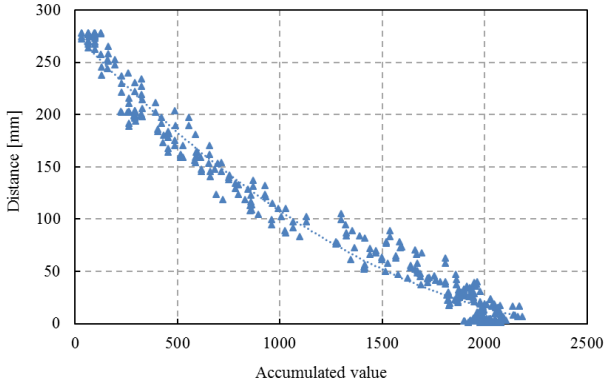


Fig. 6 Calibration result for distance estimation

3.3 実験結果及び考察

Fig. 7 に頭部姿勢正面時の計測結果の一例，Fig. 8 に頭部姿勢横向き時の計測結果の一例，Fig. 9 に計測距離と基準距離の5試行分の平均誤差を距離ごとに比較した計測誤差の結果を示す．Fig. 8 より，頭部姿勢正面時は，赤外線アレイセンサでの計測距離が時間遅れなく基準距離に追従し，顔への最接近時も高精度で距離計測が可能である．しかし，Fig. 9 より，頭部姿勢横向き時は，顔への最接近時ににおいて計測距離の追従性が低下した．Fig. 10 より，赤外線アレイセンサによる距離計測誤差は，手部が顔に接近するにつれて小さくなり，50[mm]以内では正面時5.4[mm]，横向き時10.7[mm]であり，最接近時に高精度の距離計測精度が可能であることが確認できる．本研究の目的は電動義手と使用者の衝突を回避するための距離計測システムの開発であり，最接近時の精度が最も重要であるため，この結果は提案手法の有用性を示すものである．しかし，頭部姿勢正面時と横向き時の誤差結果を比較すると，100[mm]以下では，正面時に比べて横向き時に誤差が増大している．原因としては，毛髪や皮膚の表面などの特徴の変化が温度特性に影響を及ぼしたと考えられる．そのため，頭部の姿勢に応じたパターンマッチングを用いて距離計測を行うことで，精度の向上を図ることができると考えている．

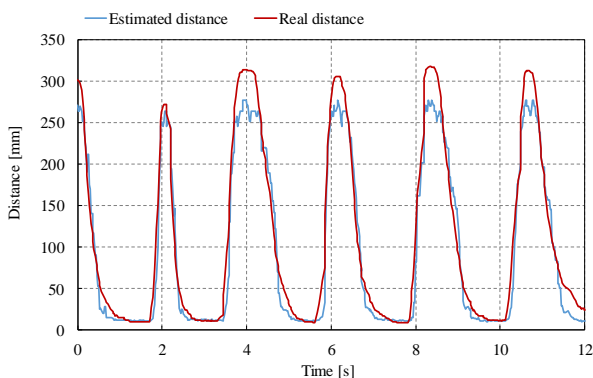


Fig. 7 Measuring result for front of face

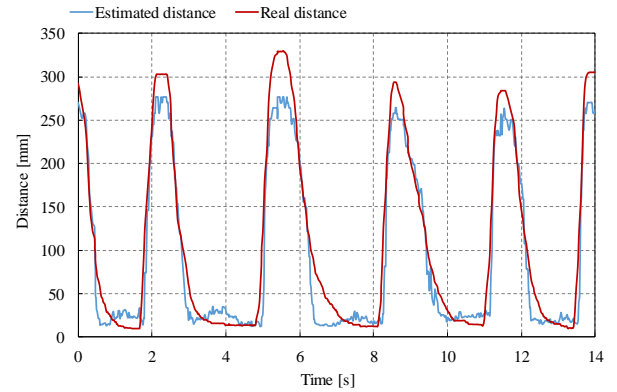


Fig. 8 Measuring result for side of face

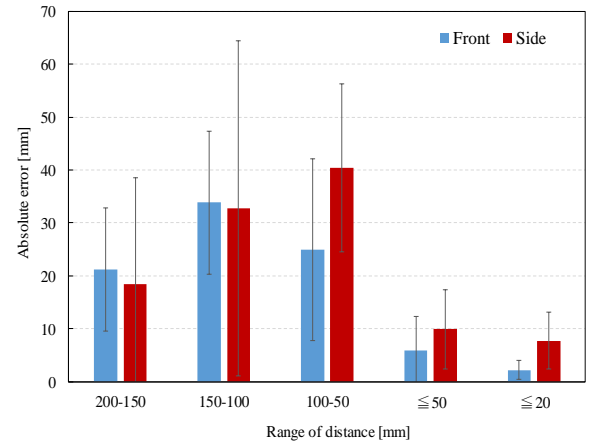


Fig. 9 Measurement error result for estimated distance

4. リアルタイム頭部姿勢識別実験

4.1 実験目的及び方法

赤外線アレイセンサを用いた距離計測精度の向上を目的とし，姿勢に対応した校正式により距離計測を行うため，赤外線アレイセンサから取得した温度画像の特徴量を用いて頭部の姿勢識別を行う．分類するクラスは，正面を向いたとき，横を向いたときの2クラスとする．提案する識別手法は，一般的なパターン認識手法の一つである K-NN 法 (k-nearest neighbor method; k 最近傍識別法)を用いる．K-NN 法は，教師データをすべて記憶しておき，新たに識別したいパターンである x から近い順に k 個の教師データを選び，その多数決によってクラスを決定する⁽⁴⁾．本研究では，赤外線アレイセンサから PC に送信された温度分布の特徴量を教師データと照合し，分類器で正面・横向きの識別を行う．温度画像の解析・分類には Python および機械学習ライブラリ Scikit-Learn を用いた．識別に用いる特徴量は，姿勢変化に伴う温度変化や形状変化をとらえるため，出力温度画像上の各 64 画素の温度値とする．姿勢識別の教師データは，正面時：1 および横向き時：0 の 2 クラスにラベル付けされた 64 個の特徴量であり，計 300 サンプル用意した．教師データの取得は，センサと顔までの距離 10～300[mm] 間での接近・離反の動的条件下におけるものである．また，K-NN 法で用いる k 値を決定するため， $k=1, 3, 5$ の 3 パターンでの姿勢識別を行ったところ，分類の適中率は k 値に関わらず正面，横向きともに 94%以上の適中率であった．また， $k=1$ のとき，合計の適中率は 95.8%であり，最も高い適中率を得られることが確認されたため，本実験では，K-NN 法は $k=1$ で行っている．

4.2 実験結果及び考察

Table. 2 にリアルタイム頭部姿勢識別精度評価実験の的中率，Fig. 10 に頭部姿勢正面時の識別結果の一例，Fig. 11 に頭部姿勢横向き時の識別結果を示す。提案手法を用いてリアルタイムに姿勢識別が行えるかを確認するため，リアルタイム姿勢識別精度評価を行った。センサを顔に向かって約 300[mm]の地点から接近・離反させたときの頭部の姿勢識別をリアルタイムで実施する。姿勢の識別クラスは，正面及び横向きとし，識別には k-NN 法(k=1)を用いた。また，識別と同時に赤外線レイセンサにより，接近・離反時の距離を算出する。Table2 に示すように，識別の適中率は，正面時 97.9[%]，横向き時 96.3[%]となり，リアルタイムにおいて高い識別率を得た。また，Fig. 10 と Fig. 11 より，識別クラスと距離変化を比較すると，誤識別が起こるのは，センサの接近・離反動作時であり，急な動作による対流のノイズが含まれたためであると考えられる。Fig11 に示す横向き時の姿勢識別の一例から，横向き時には，最接近時に誤識別が起こったことから，最接近時の温度特徴が正面時に近いと考えているが，むしろ安全性の向上につながった。以上より，リアルタイム姿勢識別において，ノイズなどの原因である一定の誤識別が見られるが，2 姿勢合計の識別適中率は 97.1%と高い適中率であり，義手に搭載してリアルタイムで姿勢識別を行うのに有用であることが確認できた。

Table 2 Hit rate of identification of posture

Class	front	side	average
Hit rate[%]	97.9	96.3	97.1

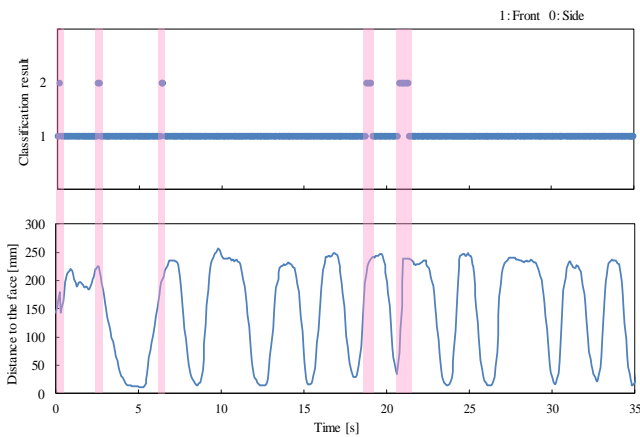


Fig. 10 Identification result for front of face

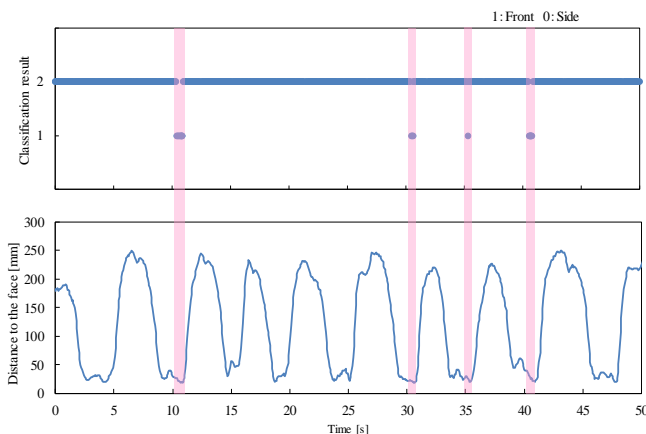


Fig. 11 Identification result for side of face

5. 結論

本研究は，電動義手の安全動作への応用を目指し，赤外線レイセンサを用いた距離計測システムの開発を目標とした，基礎実験である。動的距離計測精度評価の結果，本システムを義手の手部に搭載した動的条件下においても，実際の距離に対して高い追従性で距離計測が可能であった。また，従来の CCD による距離計測法では実現できなかった，最接近時における距離計測が可能となった。

また，計測精度の向上を目的とし，パターン認識手法の一つである K-NN 法を用いて，低解像度赤外線レイセンサの出力温度画像の各 64 画素の特徴量から，正面時および横向き時，2 クラスの頭部の姿勢をリアルタイムで識別した結果，95.8%と高い適中率で可能になった。これにより，姿勢変化に伴う温度特徴変化に対応した距離計測が可能となった。

以上より，低解像度赤外線レイセンサを用いた本システムによる距離計測が義手に搭載しての安全動作に有用であることが示された。今後は，本システムを様々な環境での応用を実現するため，使用する赤外線レイセンサの特性を基礎実験により教師パターンデータを構築することで，システム補正に活かすことを考えている。

参考文献

- (1) 厚生労働省社会・援護局障害保健福祉部:平成18年度身体障害児・者実態調査結果
- (2) Ziegler-Graham, Kathryn, et al. Estimating the prevalence of limb loss in the United States: 2005 to 2050."Archives of physical medicine and rehabilitation 89.3, pp 422-429, 2008.
- (3) Simonelli, Angela Paula, and João Alberto, Camarotto Analysis of industrial tasks as a tool for the inclusion of people with disabilities in the work market, Occupational therapy international 15.3, pp150-164, 2008
- (4) 後藤正行, 小林学: “入門 パターン認識と機械学習”, コロナ社 2014